合成孔径声呐技术研究进展

刘纪元

中国科学院声学研究所 北京 100190

摘 要 合成孔径声呐是一种高分辨率水下成像技术。该技术是基于小孔径基阵及其运动形成等效的大孔径，通过合成的大孔径波束形成过程，实现高分辨率成像。文章介绍了合成孔径声呐原理、特点、科学技术问题以及发展过程，分析了国内外合成孔径声呐研究的最新进展情况，并展望了合成孔径声呐的发展趋势。

关键词 合成孔径声呐，成像算法，运动补偿

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.03.005

图像丰富、直观，是信息的重要来源，在空气中主要靠光学设备获取。尽管光波、声波和电磁波都是信息传播的载体，但只有声波能在水下远距离传输。对水下物体、地貌等声学成像，用途十分广泛。

水下声成像设备也称为图像声呐。图像清晰是图像声呐最基本要求，这主要靠图像分辨率提供保障。图像声呐的分辨率分为距离向分辨率和方位向分辨率。距离向分辨率是指声波传播方向的分辨能力，方位向分辨率是指与声波传播方向垂直的分辨能力。距离向分辨率决定于信号的脉冲宽度或频带宽度。方位向分辨率与声呐基阵的大小（也称为孔径）有关。要提高方位向分辨率，可以采取加大声呐基阵尺寸的办法。但是加大声呐基阵尺寸又受到基阵载体、工程实现等方面的限制。

用虚拟的孔径代替真实的孔径，可解决方位向分辨率的问题，相应的声呐就是合成孔径声呐（synthetic aperture sonar，SAS）[1-3]。与普通传统侧扫声呐相比，SAS 的主要优点就是它可以得到很高的方位向空间分辨能力。

SAS 在水下目标探测方面，具有非常突出的优点和优越的性能：

（1）水下目标探测方面，在较宽的测绘带内实现高分辨率成像，目标识别率比传统声呐大大提高。同时，由于较大的测绘效率和较高的识别率，探测平台的出动次数和探测时间大大缩短。

（2）掩埋物（掩埋电缆和管线等）探测方面，SAS 探测具有不可替代的优势。30 kHz 甚至更低频段的 SAS，具有很好的掩埋物探测能力。传统的侧扫声呐不能工作在此频段；而浅剖声呐测绘条带宽度极窄，大范围扫测的效率远远低于 SAS。因此，低频 SAS 被认为

资助项目：国家高技术研究发展计划重点项目（2013AA092701）
修改稿收到日期：2019年3月9日

是掩埋物探测最可行、最有潜力的手段。

1 合成孔径声呐成像技术

1.1 合成孔径声呐成像算法

声呐成像是由回波信号解算出声呐图像（反射系数矩阵）的过程。SAS 成像算法是在 SAR 算法、CT 成像算法、地震波反演、声呐方位波束形成方法基础上发展起来的。SAS 成像的研究目前主要集中在条带式（stripmap）正侧视（broadside looking）场景，斜视和聚束 SAS 成像也开始引起研究者的注意。

SAS 成像中声波的波长通常为分米波和厘米波，与典型的 SAR 成像波长相近。由于水声速度低，相同波长 SAS 对应的水声频率很低，如水声信号波长 1.5 cm 对应的频率为 100 kHz、波长 1.5 dm 对应的频率为 10 kHz （水声传播速度取 1 500 m/s）。频带足够宽才能提高成像的距离分辨率，因为载频低，所以 SAS 成像通常相对带宽较大。因此，SAR 成像中 RD、CS 等适合窄带的算法，在 SAS 成像中很少采用。ωk 是一种适合宽带成像的频域算法，SAS 领域普遍采用。但是，SAS 采用多接收子阵成像，存在空间采样不均匀问题，需要相位修正才能完成频域处理。

时域逐点延时相加法，是 SAS 最基本的成像方法，相当于 SAR 中的二维时域相关处理法。这种方法运算效率比频域算法低得多，在实时成像系统中较少采用。但是时域算法对多接收子阵成像，空间采样不均匀性影响小、处理灵活。FFBP 算法是一种源于医学影像中的快速后向投影算法，通过牺牲一定的分辨率提升运算速度。基于二维矩阵数表的时域方法，通过存储多个事先计算好的多个二维矩阵，实现实时成像。该方法通过增加一定的数据存储单元，实现了高速精确的实时成像。

经过多年的发展，SAS 成像算法基本成熟，可以满足工程实际要求。

1.2 合成孔径声呐运动补偿

从 SAS 概念的提出到现在，运动补偿一直是本领域关注的焦点问题[4-7]。对于合成孔径处理，“运动”既是解答又是问题[9]。一方面，孔径的合成依靠运动；另一方面，运动误差（运动未按照理想模型进行而带来的误差）会对成像质量产生影响。运动误差的测量、估计及补偿是 SAS 处理中十分关键的问题。

该方面的研究是在借鉴 SAR 领域的成果之上进行的。SAS 运动基本思路是按照大的运动误差抑制由运动误差估计及补偿实现，残余的运动误差及声波传输媒质不稳定的影响可通过回波数据的相关性进一步补偿。

尽管从起步阶段一直是关注的问题，也取得一系列研究成果，SAS 运动补偿研究远未成熟。而且随着分辨率、作用距离等需求不断提升，工程上对运动补偿要求也越来越高。

1.2.1 基于回波的运动补偿

根据理论分析，运动误差超过波长的 1/8 就会对 SAS 成像产生明显影响。早期 SAS 运动补偿研究，主要集中在回波数据的相关性及其在运动补偿方面的应用上。因为验证主要依拖曳平台进行，较少配置运动测量设备，即使配有高性能的组合惯性测量（或惯导）也达不到要求的精度。

基于回波数据的运动补偿主要围绕 DPC（displaced phase center）或改进型展开。DPC 方法与雷达成像中的动目标检测相似，利用多接收子阵相邻周期回波的重叠相位中心相位，估计出运动误差，从而进行运动补偿，相关研究也有一些成果[8-10]。

通过各距离上回波数据 DPC 及平均处理，可以得到运动误差估计，再将得到的估值修正各距离上回波数据，就完成了运动补偿过程。这类基于回波的运动补偿，在仿真试验和实验室水槽试验中，可以取得较好效果。但是，对湖海上试验数据，运动补偿效果还存在鲁棒性问题。与 SAR 不同，SAS 成像具有大距离向开角的特点，空变效应明显。非理想运动航迹产生

的误差，映射到不同距离的回波数据上，尽管变化规律相近但误差曲线不完全相同，空变效应越大、误差曲线差异性越大。解决空变的方法按照距离分段进行运动误差估计及其相应的运动补偿，但是分段过多会带来误差估计信噪比降低、各段边缘相位连续性变差等问题。

1.2.2 基于运动传感器的运动补偿

SAR运动平台（如飞机、卫星等）一般配有运动传感器（惯导），SAR成像中通过运动传感器进行运动补偿（粗补偿），并通过后续的图像域进行自聚焦处理，对残余误差进行补偿（精补偿）。

SAS研究早期中采用拖曳试验平台一般不配备高精度运动传感器。随着SAS技术不断发展、工程上也开始得到应用，近年来先进的SAS系统也开始配组合运动传感器（如光纤陀螺仪、声学多普勒计程仪、水下超短基线定位仪等）。另外，无人潜航器（UUV）平台都配有惯导系统，可为UUV搭载的SAS系统提供运动测量信息，用于相应运动补偿。

法国Xblue公司采用Phins组合运动传感器与DPC融合方面，一直开展相关研究，并取得一定进展。

1.3 基于地理信息系统的图像镶嵌

利用SAS搭载平台的运动测量信息生成的地理信息系统，可以对目标自动定位、支持自主作业航迹规划。在地理信息系统中，对条带成像后的声图进行镶嵌（或称拼接），形成大范围的图像。

基于地理信息的粗粒度拼接，主要利用多幅图像的地理信息，典型的如GPS，将多幅图像的重叠部分进行融合后拼接。其基本步骤如下：

（1）图像预处理。

（2）构造特定分辨率的图像矩阵，并确定各网点的地理信息。

（3）计算多幅待镶嵌图像各点的地理信息，并将各点的地理信息与构造的图像矩阵进行对应，将像素值增加至相应的图像矩阵网点上。

基于图像特征的细粒度拼接，利用图像本身的各类统计特性或特征进行图像的配准和拼接。在粗拼接的基础上，进行精细处理，可获得更好效果。

1.4 水声环境影响

水声信道的稳定性、时间相关性与空间相关性以及物体声散射特性等是合成孔径声呐的物理基础。20世纪70—80年代的研究和一些实际海上测试工作，主要集中在合成孔径技术在水下是否能够应用方面。试验表明，海洋声场的空间相干长度一般有几十到几百个波长，时间相干性一般有几分钟到几十分钟，能够满足孔径合成的要求。

成像中声波传播过程受水声信道制约是从信息传输的角度描述，从水声物理的角度来说，这个过程主要受水声环境的影响和制约。随着SAS研究的深入和工程上的成功应用，水声环境对成像的影响也不断深化。水声环境的制约是影响SAS成像质量进一步提高的关键因素，开展该方面的研究是十分有意义的。但水声环境不同区域差异大，需要大量试验支持，相关结果在图像重建中模型修正复杂；该方面的研究的特点是高投入、高风险，若能取得实效也将高回报[11]。

2 合成孔径声呐技术发展历程

2.1 国外情况

声呐和雷达从原理到应用有很多相似之处，而合成孔径声呐与合成孔径雷达，更像一对孪生兄弟，经历了相似的发展过程。合成孔径雷达于20世纪50—60年代起步，于20世纪80年代快速发展，并取代传统侧视雷达成为对地观测重要手段。

SAS研究从20世纪60年代起步，20世纪60—70年代发展缓慢，主要原因是技术实现上的困难问题和对技术上是否可行的认识问题。在SAS研究领域，制约其技术发展的两个关键问题：① 水声信道，水

声环境（时变信道）一般比较恶劣，不同回波信号的相干性是个问题。特别是浅海水声环境条件不理想，同空气中电磁波工作环境相比，是更为"敌意"的媒质。这是当时主流观点认为水声信道太不稳定，不适合合成孔径处理。② 声波传播速度比电磁波慢得多，由于方位模糊问题，使得信号空间采样率较低，这极大地限制了 SAS 载体的运动速度，进而限制了测绘速度的提高。

在 SAS 研究处于低潮时期，仍有一些学者坚持不懈地探索，并进行了一系列水声环境实验。结果表明，水声信号的相干性能够满足合成孔径成像要求。声传播速度慢导致信号空间采样率低和限制 SAS 载体运动速度等问题也可以通过多子阵的办法来弥补。

进入 20 世纪 90 年代，西方主要发达国家纷纷投入巨资，针对 SAS 科学和技术问题开展研究工作。

进入 21 世纪，SAS 技术取得了快速发展：相关技术已达到实用水平，相应的产品和军用装备也已经出现。

据 *Unmanned Vehicles* 和《简氏防务周刊》报道，美国海军把 Edge Tech 4400 合成孔径声呐系统装到猎雷 UUV上，作用距离提高 4 倍、分辨率提高 36 倍。该型声呐美国已经对外禁运。

2.2 国内情况

国内 SAS 技术的系统性研究，是在国家"863"计划的支持下开展起来的。1997 年，在原国家科委主任宋健院士的倡导下，SAS 正式列为国家"863"计划项目。在李启虎院士组织和带领下，一支充满活力、有创新精神的科研队伍迅速组成，开始了 SAS 理论和技术的研究工作。

经过多年坚持不懈，我国在 SAS 研究方面进步巨大。先后突破了一系列关键技术，研制出多型、多频段 SAS 成像系统，技术水平达到国际先进，部分技术国际领先水平。

我国在 SAS 技术研究方面起步晚，但发展非常快。中国科学院声学研究所于"九五""十五"和"十一五"期间持续得到"863"计划支持。经历了原理和关键技术探索、海试样机和工程样机研制等阶段，在关键技术和多型系统研制方面，取得了一系列重大突破。2010 年底最新完成的 SAS 工程样机，是世界上首次研制完成同时具备高、低频同步实时成像能力的 SAS 系统，其各项性能指标达到国际领先水平，该系统在掩埋目标探测和识别方面表现出优越的性能。SAS 工作在高频段，可大幅提高成像分辨率，成为传统侧扫的升级换代产品。而在低频段，它可穿透成像，实现对掩埋物的探测识别，填补传统成像声呐在该方面的空白。

国外 SAS 研究一般从高频 SAS 起步，而我国 SAS 研究起步阶段选择低频 SAS 作为切入点。尽管低频 SAS 技术难度大、技术突破时间历程长，但是需求更迫切。

2012 年，中国科学院声学研究所高频型 SAS 和双频型 SAS 完成设计定型。此后，在 SAS 系统研究及产品化方面，取得长足进展，并在一系列国际合作、国内重大项目中得到应用，取得非常好的应用成果。2018 年，中国科学院声学研究所就三频合成孔径声呐设计方法建立了首个合成孔径声呐国内行业标准。

通过湖上、海上试验，取得了大量清晰水底和小目标图像的试验结果。许多高质量成像，远好于国外的试验结果。图 1 为一组湖底高频地貌精细成像。千岛湖为人工湖，被淹没前为农田，图中可见梯田、河道、废弃桥墩等。

双频 SAS 可高低频同步成像，便于掩埋与非掩埋状态的识别。图 2a 和 b 分别为低频 SAS 和高频 SAS 对同一个区域同时成像的结果。图 2a 为掩埋输油管低频穿透成像结果，而图 2b 为同一区域高频表面成像结果。通过两图比对，确定油管为掩埋状态。

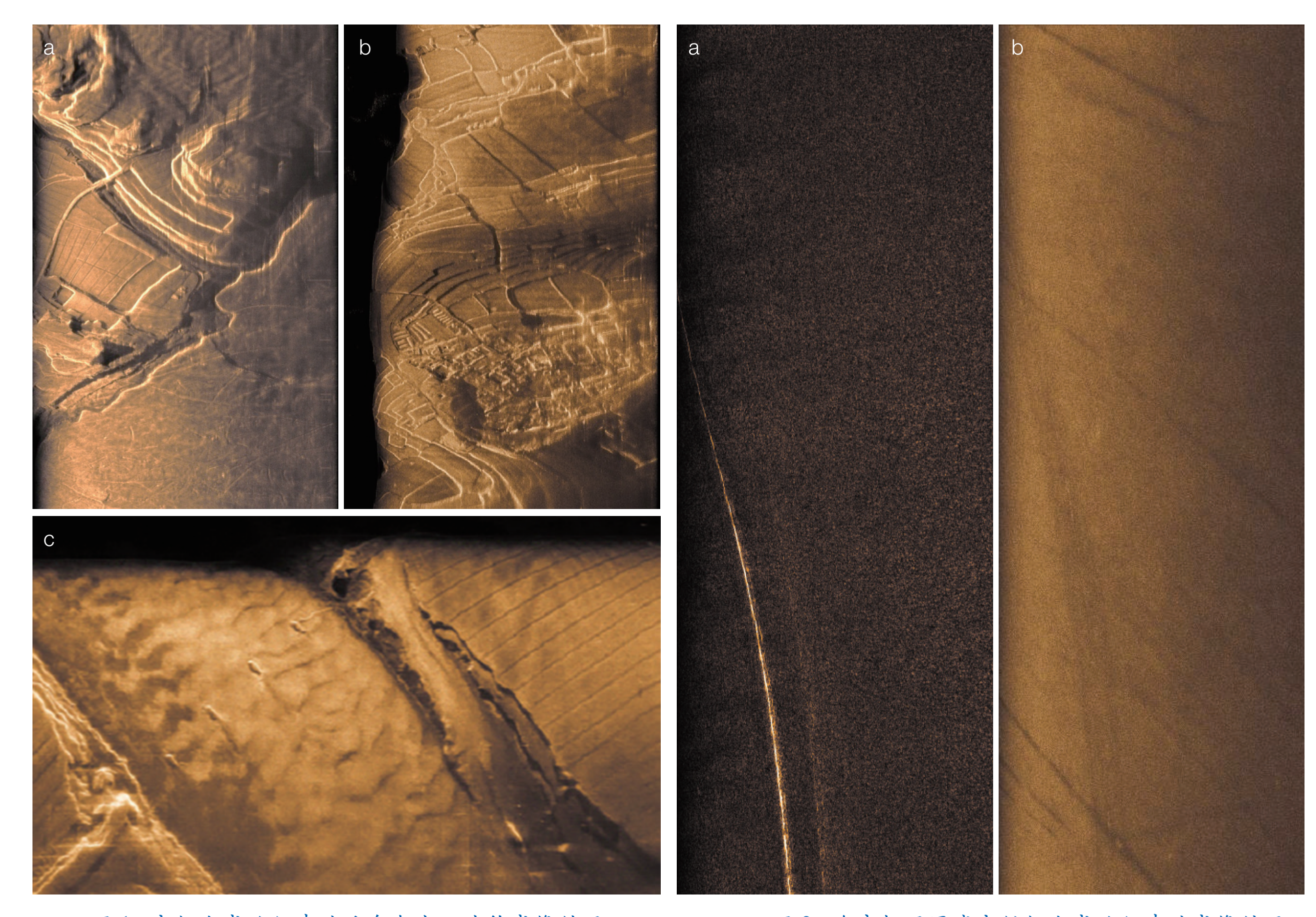


图 1 高频合成孔径声呐千岛湖水下地貌成像结果
（a）淹没在水下的山坡和农田；（b）淹没在水下的梯田；（c）淹没在水下的桥墩与河道

图 2 海底相同区域高低频合成孔径声呐成像结果
（a）低频合成孔径声呐成像结果（掩埋深度 1 m 的海底输油管道）；（b）高频合成孔径声呐成像结果（无穿透能力，看不到掩埋油管）

3 合成孔径声呐技术的发展趋势

SAS 从理论研究上逐步深入，相关技术已经在工程上得到应用。理论和技术研究的主要趋势：

（1）SAS 系统集成技术，尤其针对多频段（高、中、低）和多平台（拖曳、舷侧、UUV 等）等背景的SAS应用问题，是该技术推广应用中的重要问题。

（2）紧跟电子技术的快速发展、结合主流发展的实时处理系统架构，不断探索相应的高效快速成像算法，会持续提升 SAS 系统实时处理能力及性能水平。

（3）运动补偿技术是永恒的主题，随 SAS 性能提升会不断提出更高要求。惯导和运动测量技术的不断进步也会带动 SAS 运动补偿技术的发展。

（4）与水声物理理论研究相结合，会推动 SAS 研究的深入发展。目前声呐成像信号处理一般把声场环境假定为理想的自由场，相应的数学模型是基于该假设下得到的。理想的自由场假设，与实际声场环境，特别是近海海洋环境差距较大。开展合成孔径成像的水声物理理论研究，一定会促进成像处理性能的进一步提高。

参考文献

1 Walsh G M. Acoustic mapping apparatus. Journal of the Acoustical Society of America, 1969, 47(5): 1205.

2 Gilmour G A. Synthetic aperture side-looking sonar system. Journal of the Acoustical Society of America, 1978, 65(2):

557.

3 de Heering P. Alternate schemes in synthetic aperture sonar processing. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1984, OE-9(4): 277-280.

4 Sheriff R W. Synthetic Aperture beamforming with automatic phase compensation for high frequency sonars// Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, Auv. IEEE. IEEE, 1992: 236-245. DOI: 10.1109/AUV.1992.225217.

5 Silkaitis J M, Douglas B L, Lee H. A Cascade algorithm for estimating and compensating motion error for synthetic aperture sonar imaging// Image Processing, Icip-94, IEEE International Conference. IEEE, 1994: 905-909. DOI: 10.1109/ICIP.1994.413443.

6 Tonard V, Brussieux M. Towards development of autofocusing schemes for phase compensation of synthetic aperture sonars. OCEANS' 97. MTS/IEEE Conference Proceedings, 1997, (2): 803-808.

7 江泽林, 刘维, 李保利, 等. 一种基于分段DPC和拟合的合成孔径声呐运动补偿方法. 电子与信息学报, 2013, 35(5): 1186-1189.

8 张鹏飞, 江泽林, 刘维, 等. 一种适合于大测绘带宽的合成孔径声呐运动补偿方法. 声学学报, 2015, 40(2): 153-161.

9 Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms. Boston, London: Artech House, 1995

10 江泽林, 张鹏飞, 翟厚曦, 等. 一种声图直航段数据自动提取及镶嵌的方法. 应用声学, 2015, 34(3): 1-6.

11 Davis B J , Gough P T , Hunt B R. Modeling surface multipath effects in synthetic aperture sonar. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, 34(3): 239-249.

Advancement of Synthetic Aperture Sonar Technique

LIU Jiyuan

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Synthetic aperture sonar (SAS) is a technique of high resolution underwater imaging. Synthetic large aperture is formed based on small aperture array and its motion, and high resolution image is hence obtained by means of beam forming for large aperture array. Principle, characteristics, problem and history of SAS are presented in the paper. Recent developments and trend are analyzed as well.

Keywords synthetic aperture sonar (SAS), imaging algorithm, motion compensation



刘纪元 中国科学院声学研究所研究员，博士生导师。中国图象图形学学会视觉传感专业委员会委员，国家“863”计划“基于无人平台的合成孔径声呐系统研究”项目首席专家。主要研究领域包括水声信号处理、高分辨率水下成像技术等。E-mail: ljy@mail.ioa.ac.cn

LIU Jiyuan Professor, Ph.D. Supervisor of Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences (CAS). He also serves as Expert of Visual Sensing Committee, a Sub-society of China Society of Image and Graphics, Chief Scientist of 863 Program of China. His main research fields are underwater acoustic signal processing and high resolution under water imaging. E-mail: ljy@mail.ioa.ac.cn

.

■责任编辑：岳凌生

参考文献（双语版）

1 Walsh G M. Acoustic mapping apparatus. Journal of the Acoustical Society of America, 1969, 47(5): 1205.

2 Gilmour G A. Synthetic aperture side-looking sonar system. The Journal of the Acoustical Society of America, 1979, 65(2): 557.

3 de Heering P. Alternate schemes in synthetic aperture sonar processing. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1984, 9(4): 277-280.

4 Sheriff R W. Synthetic Aperture beamforming with automatic phase compensation for high frequency sonars// Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, Auv. Washington D.C.: IEEE, 1992: 236-245.

5 Silkaitis J M, Douglas B L,Lee H. A Cascade algorithm for estimating and compensating motion error for synthetic aperture sonar imaging// Image Processing, Icip-94, IEEE International Conference. Austin, TX: IEEE, 1994: 905-909.

6 Tonard V,Brussieux M. Towards development of autofocusing schemes for phase compensation of synthetic aperture sonars. OCEANS'97. MTS/IEEE Conference Proceedings, Halifax, NS: IEEE, 1997: 803-808.

7 江泽林, 刘维, 李保利, 等. 一种基于分段DPC和拟合的合成孔径声呐运动补偿方法. 电子与信息学报, 2013, 35(5): 1185-1189.
Jiang Z L, Liu W, Li B L, et al. A motion compensation method for synthetic aperture sonar based on segment displaced phases center algorithm and errors fitting. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(5): 1185-1189. (in Chinese)

8 张鹏飞, 江泽林, 刘维, 等. 一种适用于大测绘带合成孔径声呐的运动补偿方法. 声学学报, 2015, 40(2): 153-161.
Zhang P F, Jiang Z L, Liu W, et al. A motion compensation method for wide-swath synthetic aperture sonar. Acta Acustica, 2015, 40(2): 153-161. (in Chinese)

9 Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms. Boston, London: Artech House, 1995

10 江泽林, 张鹏飞, 翟厚曦, 等. 一种声图直航段数据自动提取及镶嵌的方法. 应用声学, 2015, 34(3): 1-6.
Jiang Z L, Zhang P F, Zhai H X, et al. A straight track sonar images auto-extracting and mosaicking method. Journal of Applied Acoustics, 2015, 34(4): 333-338. (in Chinese)

11 Davis B J, Gough P T, Hunt B R. Modeling surface multipath effects in synthetic aperture sonar. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, 34(3): 239-249.